

University of Groningen

Longitudinale dispersie in de stroming door een ringspleet met draaiende binnencilinder
van Lookeren Campagne, Nicolaas

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1966

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

van Lookeren Campagne, N. (1966). *Longitudinale dispersie in de stroming door een ringspleet met draaiende binnencilinder*. Druco.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

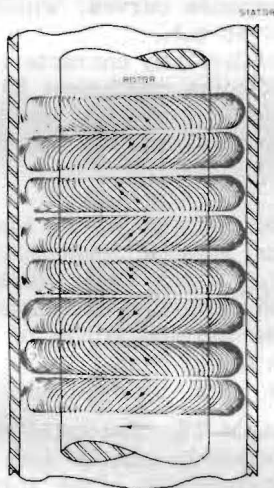
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

LONGITUDINAL DISPERSION IN FLOW THROUGH AN ANNULUS WITH A ROTATING INNER CYLINDER

SUMMARY

The subject of this thesis is an investigation into longitudinal dispersion (spreading of material) in a fluid flowing through an annulus between two coaxial cylinders, the inner rotating, the other stationary. This arrangement is often referred to as the Rotating Cylinder Contactor (RCC).



Pattern of toroidal vortices
in RCC

The flow in the RCC shows - dependent on various conditions - a regular pattern of large, stable, toroidal vortices with a diameter about equal to the width of the gap. The vortices travel at the mean axial flow velocity through the annulus, each vortex retaining its identity and mixing to some extent with the two neighbouring vortices.

The flow pattern and the resulting longitudinal dispersion are in themselves an interesting subject of mixing between well-defined vortices and are important when the RCC is used - in continuous processes - as a countercurrent extractor, a distilling column or a reactor. These processes give rise to longitudinal concentration gradients in the annulus, which are partly levelled out by the hydrodynamic longitudinal dispersion. This affects the process results adversely.

We have made it our object to measure the longitudinal dispersion in the annulus and to study its relation with the vortex pattern. This pattern is determined by two Reynolds numbers, one for the tangential flow caused by the rotating inner cylinder ($Re_{\Delta R}$) and one for the axial flow due to an axial pressure gradient along the annulus (Re_{ax}), and by the geometric parameters representing the ratios of width of annulus to radius of rotor ($N_{\Delta R}$), length to width of the annulus (N_L), and the boundary conditions at the ends of the annulus (formally represented by N_D). We studied annuli of different relative width $N_{\Delta R}$, considering mainly a geometry of interest for use of the RCC as an apparatus for physical separations or chemical reactions. The Reynolds range covered is large enough to enable the longitudinal dispersion to be predicted also for commercial-size RCC's, so that we can formulate scale-up rules.

Chapter I introduces the subject and describes the purpose of the investigation in greater detail. It further presents a survey of the literature on the RCC, which mainly deals with studies of the flow in the RCC, momentum and heat transfer across the annulus, and the use of the RCC as a counter-current liquid/liquid extraction apparatus.

Chapter II gives a picture of the flow pattern in the annulus deduced from literature data and our own measurements. As two extreme forms of the RCC, the linear Couette flow ($N_{\Delta R} = 0$) and the flow around a cylinder rotating in infinite space ($N_{\Delta R} = \infty$) are included in this picture. It shows in what range the stable secondary vortices occur. The vortices are important for suppressing the velocity profile caused by an axial flow through the annulus, thus greatly reducing longitudinal dispersion.

Chapter III reviews in detail the causes of longitudinal dispersion and discusses how this phenomenon is measured and characterised. In addition, it gives a new method to characterize pulse-response curves, which in many cases offers advantages over the methods used so far.

The longitudinal dispersion in the RCC is satisfactorily characterized by the "diffusion model" with a longitudinal eddy diffusion coefficient ID as parameter. This chapter also shows how to test the agreement between longitudinal dispersion in the actual RCC and its prediction by the flow model.

Chapter IV discusses the experimental determination of the longitudinal eddy diffusion coefficient at annular widths varying from 0.1 to 2.5 times the radius of the rotor and at values of $Re_{\Delta R}$ which in the various RCC's were varied by a factor of minimum 100 and maximum 3000 (range $300 < Re_{\Delta R} < 10^6$). As the dimensionless group for the magnitude of the longitudinal eddy diffusion coefficient we chose $N_D = ID/\nu$.

The results of the 400 experiments are correlated by $N_D = a Re_{\Delta R}^n \cdot 10^{-0.19 N_{\Delta R}}$ with a standard deviation of 7%. The axial flow may cause N_D to increase as a consequence of boundary effects and, at relatively high Re_{ax} values, as a consequence of a disturbance of the vortex pattern. The function $N_D = f(Re_{ax}, N_I, N_L)$ is discussed qualitatively. The molecular diffusion coefficient (D_{mol}) proves not to affect the longitudinal dispersion, even at the relatively low values of $ID/D_{mol} \approx 10$.

The first part of Chapter V deals with the physical background of the empirical N_D correlation. It is seen that at about $0.1 < N_{\Delta R} < 1$ there are relatively strong secondary vortices which greatly affect longitudinal dispersion. The strength of the vortices decreases with increasing turbulence of the tangential flow ($Re_{\Delta R} > ca. 10^5$), with increasing relative width of the annulus ($N_{\Delta R} > ca. 1$) and in very narrow annuli ($N_{\Delta R} \ll 0.1$). The influence of the secondary vortices on longitudinal dispersion consists, on the one hand, in suppressing effectively residence time spreading caused by the velocity profile of the axial flow in the annulus, on the other hand, in promoting some true longitudinal eddy mixing.

For comparison with the RCC, a survey has been made of longitudinal dispersion in other apparatus with large secondary vortices. This survey also illustrates the various causes of longitudinal dispersion.

The latter part of Chapter V shows the adverse effect of longitudinal dispersion on the results of a countercurrent extraction process and of a reaction carried out in the RCC, both on a small and on a large scale. From these considerations it follows that the RCC, on account of the somewhat greater longitudinal dispersion, is somewhat less suitable than the frequently used Rotating Disc Contactor (RDC) for large-scale physical separations and chemical reactions. The simple design of the RCC, however, is an advantage over the RDC and similar apparatus. In the case of, for instance, highly corrosive substances or components easily adhering to the walls this might be a reason for preferring an RCC. The present investigation into the longitudinal dispersion in RCC's ranging from laboratory to commercial scale - besides being of general interest - may assist in evaluating this apparatus for special processes.

I. INLEIDING, DOELSTELLING EN LITERATUUROVERZICHT

I-1. Inleiding en doel van het onderzoek

In dit proefschrift worden enige eigenschappen besproken van de stroming van een fluïdum door de Ringspleet tussen twee Coaxiale Cilinders, waarvan de binnencilinder draait en de andere stilstaat. Wij zullen deze ringspleet verder aanduiden met RCC.

De stroming in de RCC vertoont - afhankelijk van de kengetallen - een interessant, regelmatig patroon van grote secundaire toroïdale wervels. De wervels vormen paren met tegengestelde draairichting en de diameter van een wervel is ongeveer gelijk aan de breedte van de ringspleet. Fig. I-1-1* geeft een indruk van deze wervels voor verschillende rotatiesnelheden van de binnencilinder. Bij een axiale vloeistofstroom door de RCC bewegen de wervels zich - met ongeveer de gemiddelde axiale vloeistofsnelheid - met de stroom mee. Iedere wervel behoudt daarbij zijn identiteit en heeft een bepaalde materie-uitwisseling met zijn twee naastliggende wervels.

Het patroon van secundaire wervels is voor het eerst beschreven door Taylor⁵⁹ in 1923 en is sindsdien het onderwerp geweest van vele hydrodynamische en fysisch-technologische onderzoeken, welke deels van min of meer fundamentele aard waren (bv. stabiliteitsberekeningen) en deels praktische toepassingen van de stroming in de RCC behandelden. Als voorbeelden noemen wij de studies over de radiale warmteoverdracht in de ringspleet, met het doel in elektromotoren de warmteafvoer van de roterende kern naar het huis van de motor te bevorderen. In de papiertechnologie heeft men zich voor het wervelpatroon geïnteresseerd bij de fabricage van papier in zgn. fourdriniermachines, omdat het wervelpatroon daar strepen op het papier kan geven. Voorbeelden van recente onderzoeken zijn die van Coles¹³ en Astill⁵ (1965), respectievelijk over de modificaties van het wervelpatroon in de RCC en het ontstaan van de secundaire wervels bij een axiale stroming door de ringspleet.

Bij het gebruik van de RCC als tegenstroom-extractieapparaat, reactor of destillatiekolom spelen de secundaire wervels eveneens een belangrijke rol. In deze continue processen zijn de wervels enerzijds nuttig omdat zij het stof- en warmtetransport in radiale richting bevorderen, anderzijds echter nadelig omdat zij in de stroming van de fase(n) door de RCC het meestal ongewenste effect geven van een longitudinale dispersie (spreiding van materie). Wanneer namelijk in de RCC continue processen worden uitgevoerd, dan zullen deze processen longitudinale concentratiegradiënten ten gevolge hebben, die echter door het optreden van de hydrodynamische longitudinale dispersie weer gedeeltelijk worden genivelleerd, en dit houdt meestal een belangrijke vermindering van het beoogde resultaat in.

In verband met het bovenstaande hebben wij ons in dit proefschrift ten doel gesteld, van een fluïdum dat door de RCC stroomt de longitudinale dispersie te meten en te onderzoeken op welke wijze deze dispersie samen-

* De figuren en tabellen zijn in een afzonderlijk deel van dit proefschrift samengebracht.

hangt met het patroon van secundaire wervels in de ringspleet*. De volgende dimensieloze kengetallen spelen hierbij een rol: twee Reynoldswaarden kenmerkend voor de tangentiale en de axiale stroming door de RCC (resp. $Re_{\Delta R}$ en Re_{ax}), de geometrische parameters die de verhouding weergeven van spleetbreedte tot rotorstraal ($N_{\Delta R}$), lengte tot breedte van de ringspleet (N_L) en de randcondities aan de uiteinden van de RCC (formeel weergegeven door N_I), en verder het kengetal van Schmidt voor de moleculaire diffusie (Sc). De longitudinale dispersie werd als functie van $Re_{\Delta R}$, $N_{\Delta R}$, Re_{ax} , N_L , N_I en Sc gemeten bij een geometrie van de ringspleet welke van interesse is bij het gebruik van de RCC als apparaat voor fysische of chemische processen en in een Reynoldsgebied dat groot genoeg is om ook de longitudinale dispersie van RCC's op commerciële schaal te bevatten, zodat vergrotingsregels voor de RCC kunnen worden gegeven. In het proefschrift worden verder nog enige aspecten behandeld die met de longitudinale dispersie verband houden. Deels dienen zij als achtergrond voor de empirische correlatie van de longitudinale dispersie in de ringspleet en deels geven zij voorbeelden van de invloed van de longitudinale dispersie op de resultaten van in de RCC uitgevoerde processen.

I-2. Indeling van het proefschrift

Dit hoofdstuk besluit met een overzicht van de literatuur over de RCC. In Hoofdstuk II wordt uit de vrij schaarse literatuurgegevens en enige eigen metingen een globaal beeld van het wervelpatroon als functie van de daarop betrekking hebbende kengetallen samengesteld. Deze studie bestrijkt - vergeleken met de meeste gegevens in de literatuur - een gebied met vrij grote $N_{\Delta R}$ - en $Re_{\Delta R}$ -waarden.

Hoofdstuk III behandelt het probleem hoe het "mechanisme" van de longitudinale dispersie opgespoord en door een eenvoudig stromingsmodel gekarakteriseerd kan worden. Wij zullen zien, dat de longitudinale dispersie in de RCC zeer goed te beschrijven is door middel van het zgn. diffusiemodel: een uniforme "propstroming" met daarop gesuperponeerd een longitudinale werveldiffusie.

Hoofdstuk IV bespreekt de experimentele bepaling van de diffusiecoëfficiënt - dimensieloos weergegeven door het kengetal N_D - en de correlatie van de uitkomsten tot een verband $N_D = f(Re_{\Delta R}, N_{\Delta R})$, waarbij de spleetwijdte is gevarieerd van ca. 0,1 tot ca. 2,5 maal de rotorstraal en $Re_{\Delta R}$ in de verschillende RCC's is gevarieerd met een factor die minstens 100 en maximaal 3000 bedraagt. Ook de invloed van Sc , Re_{ax} , N_L en N_I op N_D wordt in dit hoofdstuk besproken.

Hoofdstuk V bestaat uit twee delen. In het eerste deel wordt het verband tussen de empirische N_D -correlatie en het stromingspatroon in de ringspleet besproken en de longitudinale spreiding in de RCC met die in andere apparaten vergeleken. In het tweede deel wordt aangegeven, in welke mate de longitudinale-diffusiecoëfficiënt in de ringspleet het resultaat van een

* Soortgelijke metingen werden door Croockewit, Honig en Kramers¹⁵ in 1953 verricht. In het laatste hoofdstuk van dit proefschrift worden de verschillen tussen de beide onderzoeken besproken.